第 42 卷 第 4 期
2024 年 12 月

天 文 学 进 展
PROGRESS IN ASTRONOMY

Vol. 42, No. 4
Dec., 2024

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2024.04.01

国际天文大装置科学区域中心的建设与运行

刘 爽[1]，沈志强[2]，安 涛[2]，王 锋[3]，郭 铨[2]，
左 琛[1]，刘一良[1]，赵 静[1]

(1. 科学技术部 国际科技合作中心，北京 100036； 2. 中国科学院 上海天文台，上海 200030； 3. 广州大学，广州 510006)

摘要： 随着天文学研究的不断深入，国际天文大装置的建设与运行日益成为推动科学进步的重要因素。综述了国际天文大装置科学区域中心的建设现状与运行机制，探讨了其在数据管理、科研合作和用户支持等方面的作用。首先介绍了科学区域中心的定义及其在天文研究中的重要性，接着分析了多个典型区域中心的天文大装置，包括低频阵列望远镜 (Low-Frequency Array, LOFAR) 和阿塔卡马大型毫米/亚毫米波阵 (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array, ALMA) 等，强调了基础设施、技术投资和管理架构对其成功的影响。在此基础上，进一步讨论了当前面临的挑战，如资源分配、数据共享与合作机制，并展望了未来的发展方向与趋势，对未来天文大装置科学区域中心的建设和运维有参考与借鉴价值。

关 键 词： 射电天文；天文大装置；区域中心

中图分类号： P16 **文献标识码：** A

1 引 言

天文学，这门古老而又神秘的学科，见证了人类对宇宙的不断探索和认知。从古代人们仰望星空，试图解读宇宙的奥秘，到现代天文学家借助先进仪器，深入探究宇宙的每一个角落，天文学始终伴随着人类前行的脚步。现代天文学的突破，如宇宙微波背景辐射的精确测量、引力波的直接探测以及遥远星系的深入研究，都依赖于大型天文装置的建设和运行。国际天文大装置，如阿塔卡马大型毫米波/亚毫米波阵列 (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array, ALMA)[1–3]、平方公里阵列 (Square Kilometre Array,

收稿日期： 2024-09-25； **修回日期：** 2024-09-29

资助项目： 国家自然科学基金 (12373097, 1243000372)

通讯作者： 赵静，zhaojing@most.gov.cn

SKA)[4, 5]、低频阵列望远镜 (Low-Frequency Array, LOFAR)[6]和激光干涉引力波天文台 (Laser Interferometer Gravitation-Wave Observatory, LIGO)[7, 8] 以及大型巡天综合望远镜 (Large Synoptic Survey Telescope, LSST) 等，已经成为推动天文学进步的关键工具。这些装置的建设和运行不仅需要巨额的投资和复杂的技术，还需要国际间的合作和协调。

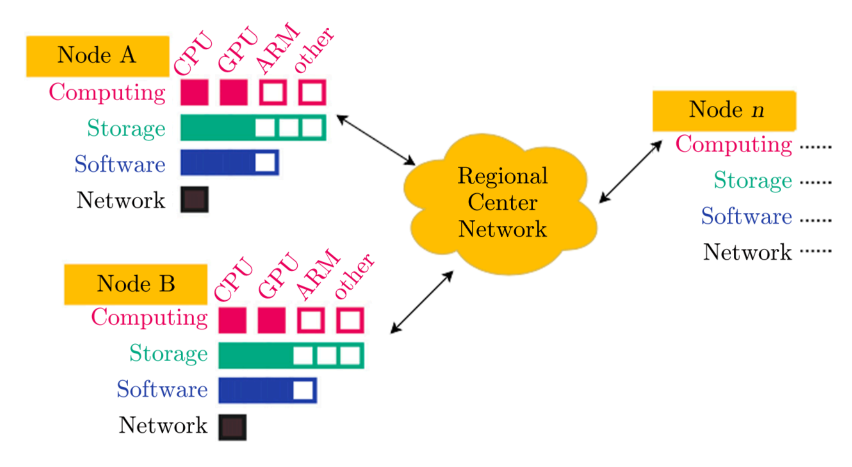
科学区域中心（科学中心、数据中心、分中心，以下统一称为科学区域中心）正是在这样的形势下应运而生，并在这些国际天文大装置中扮演着至关重要的角色。科学区域中心不仅为研究人员提供数据存储、处理和分析的支持，集中资源和专业技术，提高数据利用效率，加快科学发现的速度，还提供用户支持、教育和培训服务，促进公众对天文学的理解和认识。因此，研究这些区域中心的建设与运行对于理解国际天文合作的复杂性、提高科学研究的效率和促进科学知识的传播具有重要意义。

本文旨在探讨国际天文大装置科学区域中心的建设与运行，包括组织结构、运营模式、面临的挑战以及成功的关键因素，为我国未来主导或参与的国际天文大科学工程提供参考，为天文学的可持续发展做出贡献。在本研究中，我们将分析几个具有代表性的科学区域中心的规划和建设及日常运营的各个方面，并探讨它们如何支持科学研究和教育活动。本文的结构如下：第 2 章给出科学区域中心的概念和功能；第 3 章将分析代表性国际大科学工程 (ALMA、LOFAR、LSST、SKA) 科学区域中心的建设和运行；第 4 章将探讨面临的挑战和解决方案，并提出未来研究的建议。

2 科学区域中心的概念与功能

在天文学领域，随着观测数据量的激增和观测技术的不断提高，科学区域中心的概念应运而生，旨在提供一个集中的场所，从各方面支持和促进科学研究。科学区域中心是指在特定地理区域内建立的数据处理和分析中心，旨在支持国际天文大装置（或大科学工程）项目的数据管理、分析和共享。这些中心通常由参与国共同投资和管理，具有多种功能，以促进合作并高效利用数据。图 1 展示了简化的区域中心结构，在不同的区域中心节点中提供不同的计算元素、计算架构、存储容量、软件/服务可用性和网络特性，最终以统一标准化的方式对外提供服务。经过多年的发展，科学区域中心在国际天文大装置的生态系统中扮演着越来越重要的角色，已经成为当前国际天文装置建设中的必然组成部分，成为这些工程的数据处理和存储的枢纽，是科研合作、教育推广和技术转移的重要平台。

科学区域中心的核心功能之一是数据存储和管理。天文学正经历着一场由观测技术进步带来的数据革命。例如，ALMA 每天可以产生 250 TB 的数据；SKA 将以每秒数 TB 的速率产生观测数据，预计每年将产生 740 PB 科学数据；LSST 项目的大规模巡天每晚产生 2 TB 数据。这些海量数据的挑战和机遇促进了天文学研究方式和方法的转型，从传统的观测技能驱动转向数据驱动和计算驱动。这涉及到从望远镜接收数据、在区域中心之间传输数据、在安全的存储系统中存储数据，以及使用专业的处理和分析软件进行处理，以便于科学家们提取有价值的科学信息。同时，科学区域中心还负责为全球的研究人员提供数据访问接



注：不同的互联节点提供不同的计算资源、存储资源、软件和网络。

图 1　区域中心示意图[9]

口，确保数据的可访问性和透明度。

用户支持是科学区域中心的另一个关键功能。区域中心为科学家和研究人员提供技术支持和咨询服务，帮助他们解决技术问题，规划研究项目，并提供必要的软件和硬件资源。此外，科学区域中心还定期举办培训研讨会和工作培训交流会议，以提高用户的研究能力和数据处理技能。

教育和培训也是科学区域中心的重要职责。通过与学校合作，区域中心开发教育课程和材料，提供实习机会，并组织公共讲座和天文观测活动。这些活动不仅有助于培养下一代天文学家和工程师，也激发了公众对天文学的兴趣。

通过科学区域中心的建设，显著推动了项目参与国的科研合作和技术推广。通过支持跨国界的研究项目，这些中心促进了知识和资源的共享，加强了国际科研合作。总体来看，在目前各国天文大装置建设中，科学区域中心通过提供数据管理、用户支持、教育与培训、科研合作和技术推广等服务，为天文学研究打下坚实的基础，并为科学社区的持续发展做出了贡献。它们不仅促进了科学发现，培养了科研人才，推动了科学普及，还促进了经济发展。

3　国际天文大装置科学区域中心的建设现状

3.1　ALMA 和区域中心的建设

阿塔卡马大型毫米波/亚毫米波阵列 (ALMA) 是一个由全球多个国家和地区共同参与的国际天文观测设施。在 ALMA 项目中，欧洲南方天文台 (ESO)、美国国家科学基金会 (NSF) 以及日本自然科学研究机构 (NINS) 的日本国立天文台 (NAOJ) 等合作伙伴之间的合作模式是多层次和多维度的。合作伙伴根据自己的能力和专长，为项目的建设和运营提供资金和技术支持。其中 ESO 代表其成员国出资，NSF 与加拿大国家研究理事会 (NRC) 和中

国台湾科学技术部 (MOST) 合作出资，而 NINS 则与中国台湾的“中央研究院”(AS) 和韩国天文与空间科学研究所 (KASI) 合作出资[3]。ESO 负责提供项目总预算的 37.5%，包括 25 面直径 12 m 的天线、天线运输车、水汽辐射计等关键设备和软件。北美地区由美国国家射电天文台 (NRAO) 代表，负责同样的预算比例和天线等贡献。东亚地区由日本国立天文台 (NAOJ) 代表，负责 25% 的预算和包括阿塔卡马致密阵列 (ACA) 在内的天线等贡献。智利则提供了世界级的观测站址，为 ALMA 的运营提供了理想的条件。此外，各合作伙伴还通过各自的区域中心[10, 11]，如欧洲 ALMA 区域中心 (ALMA Regional Center, ARC)、北美 ALMA 区域中心和亚洲 ALMA 区域中心，为各自地区的用户提供支持。这种跨国合作模式不仅确保了 ALMA 项目的顺利进行，也促进了全球天文学研究的共同进步。

ARC 是 ALMA 项目的重要组成部分，它们负责支持和服务各自地区的天文学家和研究人员，使他们能够有效地参与 ALMA 的科学活动。每个区域中心都有其特定的职责和功能，主要包括以下几个方面。

(1) 用户支持：帮助科学家准备和提交观测提案，以及在观测后处理和分析数据。

(2) 数据访问和存档：负责存储和管理来自 ALMA 的观测数据，确保用户能够方便地访问和下载这些数据。

(3) 科学协作和技术培训：通过组织研讨会、培训课程和工作坊，区域中心帮助用户提高在 ALMA 科学和技术方面的知识和技能。通过区域中心促进科学家之间的合作，协调跨区域的科学项目和研究活动。

(4) 宣传和教育：参与公共宣传和教育活动，提高公众对 ALMA 项目和天文学研究的认识和兴趣。

(5) 软件和工具的开发：参与开发和维护用于数据处理、分析和可视化的软件工具，以支持用户的科学研究。

(6) 科研资助申请：协助用户申请科研资助，以支持他们使用 ALMA 进行的研究项目。

(7) 科研产出的跟踪：跟踪和记录用户使用 ALMA 数据发表的科研成果，以评估 ALMA 的科学影响。

(8) 与 ALMA 项目的沟通：作为用户与 ALMA 中央团队之间的桥梁，传达用户的需求和反馈，以及 ALMA 项目的最新动态。

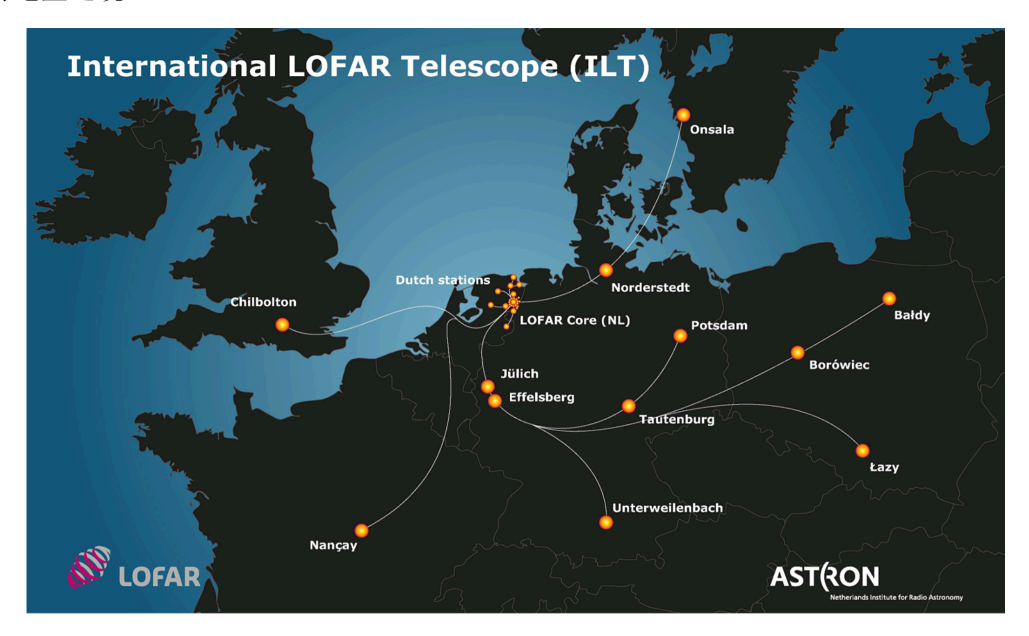
每个区域中心都针对其服务的地区和用户群体的特点，提供定制化的支持和服务。例如，欧洲 ALMA 区域中心服务于欧洲、中东和非洲的用户，北美 ALMA 区域中心服务于北美和加勒比地区的用户，而亚洲 ALMA 区域中心则服务于东亚和东南亚的用户。通过这些区域中心的工作，ALMA 能够更好地服务于全球的天文学社区。

3.2 LOFAR 区域中心

LOFAR[12]由荷兰的 38 个台站、德国的 6 个台站和其他欧洲国家的共 51 个台站组成，图 2① 给出了 LOFAR 的站点分布情况。每个台站在 10~80 MHz 的频率范围内分别有 96×2 偶极子和 48×16 或 96×16 天线（每个有 2 偶极子），工作在 110~240 MHz 的范围内。与

① https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2018/04/LOFAR_network

其他区域天线不同，来自独立天线的信号不是直接连接来作为一个单一的大天线。相反，两种类型的 LOFAR 偶极子天线可以在模拟电子设备中部分组合并数字化，然后在整个站中再次组合。来自所有站点的数据通过光纤传输到中央数字处理器，并在软件中组合以模拟传统的射电望远镜。



注：LOFAR 由荷兰射电天文研究所负责运营，由瑞典、爱尔兰、波兰等国家的 51 个站点组成，其任务是研究从地球上可以观测到的一些最低频率 (10 MHz)，探测恒星和星系形成之前的原初时代。

图 2　LOFAR 站点分布图

LOFAR 于 2012 年 12 月开始科学观测，每天产生数十到数百 TB 的数据。LOFAR 长期归档 (LOFAR Long-Term Archive, LTA)[13–15]是一个分布式数据存档系统。LOFAR 射电望远镜生成的数据在荷兰格罗宁根的计算机集群上进行预处理，随后被分发到构成 LOFAR LTA 的三个地点：荷兰的合作大学计算设施 (Samenwerkende Universitaire Reken Faciliteiten, SURF)、德国的利希超级计算中心 (Jülich Supercomputing Centre, JSC) 和波兰的波兹南超级计算和网络中心 (Poznan Supercomputing and Networking Center, PSNC)。

LOFAR 的数据流如图 3 所示，在中央处理系统上预处理的数据由数据提供节点读取，随后进行处理并传送到数据传输节点。数据传输节点将数据通过 GridFTP 传输到 LOFAR LTA 节点进行远程存储。在整个过程中，通过在不同阶段（例如在数据传输节点）进行校验及与文件大小进行比较来保持数据的完整性。在成功传输到远程存储后，望远镜管理器规范系统会向 LTA 目录提供元数据，包括观测属性和相关数据产品。截至 2023 年 10 月，德国利希超级计算中心 (JSC①) 的磁盘存储容量为 1.5 PB，磁带存储容量为 21.6 PB，以每年 2 PB 的速度增长[16]。

①https://www.fz-juelich.de/ias/jsc/EN/Home/home_node.html

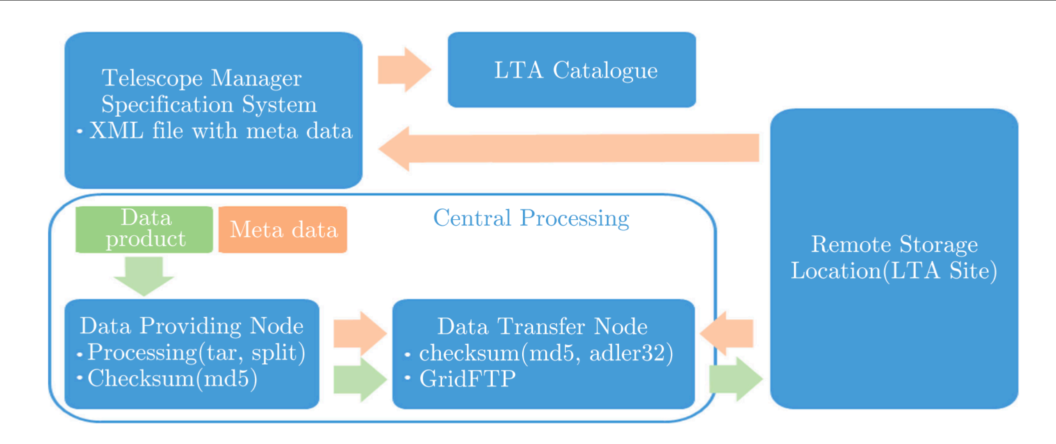


图 3 LOFAR 数据流图[16]

LOFAR LTA 为天文学家提供了一个存储和访问大量射电天文数据的平台，以支持他们从数据收集到分析和共享的整个研究过程：

(1) 数据存储和管理。LTA 存储来自 LOFAR 射电望远镜的原始数据和预处理数据。这些数据经过预处理后，被分发到不同的存档站点，包括位于德国于利希的站点。这为天文学家提供了一个可靠的数据存储解决方案，确保他们的研究数据得到长期保存。

(2) 数据访问和检索。天文学家可以通过 LOFAR 网络服务界面访问 LTA 中的数据。他们可以根据自己的研究需求选择特定的观测数据，并通过一个定制的分阶段服务将数据从档案中检索出来。这个过程对用户来说是透明的，他们只需提交数据请求，然后等待数据被“上线”到缓存池中，之后就可以下载。

(3) 数据的预处理和分析。LOFAR 数据在被存储到 LTA 之前，会在格罗宁根的计算机集群上进行预处理。这包括数据的初步处理，如信号的数字化和部分组合。预处理后的数据对天文学家来说更有用，因为它们被处理后可以直接用于后续分析。

(4) 支持大规模计算和数据处理。LTA 与高性能计算 (HPC) 资源相结合，使天文学家能够在数据存储地附近进行大规模的数据处理和分析。这意味着他们可以利用强大的计算资源来处理大量的观测数据，而无需将数据传输到远程位置。

(5) 数据的长期可用性和可持续性。LTA 的设计考虑了数据的长期可用性，确保即使在数据产生多年后，天文学家仍然可以访问这些数据。这对于长期的天文研究项目和后续研究至关重要。

(6) 遵循 FAIR 原则。LTA 致力于遵循 FAIR (Findable, Accessible, Interoperable, and Reusable) 原则，即让数据可发现、可访问、可互操作和可重用。这意味着 LTA 中的数据被组织和管理得当，以便于其他研究人员可以轻松地找到、访问和使用这些数据，从而促进了科学发现的共享和重复使用。

3.3 LSST 与研究中心概况

LSST 是由美国斯坦福线性加速器中心国家加速器实验室、天文学研究大学协会等牵头建造的大型巡天望远镜，它在国际上的合作组织涉及阿根廷、澳大利亚、巴西、加拿大、中国、法国、德国、英国、意大利、韩国等 22 个国家，包括巴西国家天体物理实验室、多伦多大学、法国国家核物理和粒子物理研究所、意大利国家天体物理研究所、韩国天文与空间科学研究所、马克斯普朗克天体物理研究所、英国科学技术设施理事会等。

LSST 观测覆盖了 320∼1 050 nm 的 6 个光学波段，对约 18 000 km^2 的天空进行观测[17]。LSST 计划在为期 10 a 的巡天中对约 18 000 km^2 的天空均匀地重复成像 800 多次。这些数据将用于多个科学目标的研究，包括探测暗能量与暗物质[18]，这些都是当前宇宙学的重大难题。通过对弱引力透镜现象的观测，LSST 可以帮助天文学家更精确地测量宇宙的膨胀速度，进而推测暗能量的本质。此外，LSST 还会对银河系进行精细结构的绘图，这对于理解银河系的形成与演化具有重要意义。

LSST 巡天系统包括一台大口径、宽视场、地基望远镜[19]，一台 32 亿像素照相机[20]，以及一个数据管理系统[21]。LSST 主设备位于智利北部的帕穹山，口径为 8.4 m，具有极宽的视场，能够覆盖 9.6 平方度的天区。LSST 配备了全球最大的一台 CCD 相机，该相机每 20 s 能拍摄一张星空的图像，因此它在 3 d 内能够完成一次全天的观测。这种广泛的覆盖和快速的巡天能力，使得 LSST 不仅在探测遥远宇宙的天文现象中具有极大优势，同时还能实时捕捉到瞬时发生的天文事件。LSST 每晚预计能够产生 15 TB 的数据，最终发布的数据目录数据库预计就将达到约 15 PB。

针对巨大的数据流，LSST 设计了一个全面的数据管理系统，在尽可能自动化的情形下，将原始数据处理为对科学有用的目录和图像。LSST 的数据管理系统包含三层[22]：基础设施层[23]，包括计算、存储、网络硬件和系统软件；中间层，包括分布式处理、数据访问、用户界面和系统操作服务；应用层[24, 25]。

LSST 的数据管理包含四个关键设施：位于帕穹山的高峰设施（在此处会进行探测器串扰校正）、位于拉塞雷纳市的基地设施（将作为数据上传到北美的转发节点，以及智利社区的数据访问中心）、伊利诺伊州香槟市国家超级计算应用中心 (NCSA) 的中央档案设施，以及法国里昂国家核物理与微粒物理研究所计算中心 (CC-IN2P3) 的卫星数据处理中心。图 4 给出了 LSST 的国际数据访问中心的拓扑结构，数据将通过现有的和新的高速光纤链路在各中心之间传输，数据处理中心将拥有强大的计算能力。

3.4 SKA 区域中心建设进展

SKA 是正在建设的世界上最大的射电望远镜[26]，目前在建的是 SKA 第一阶段 2 台望远镜，分别是位于南非的 SKA1 中频阵 (SKA1-MID，观测频率为 350 MHz 至 14 GHz) 和位于澳大利亚西部的 SKA1 低频阵 (SKA1-LOW，观测频率为 50∼350 MHz)。SKA 望远镜的科学目标广泛，旨在探测天文学研究中的未知领域，例如宇宙再电离时代 (epoch of reionization, EoR) 信号的探测、宇宙磁场的起源和演化、星系形成和演化等[27]。SKA 数据流如图 5 所示：从澳大利亚默奇森内陆的 SKA1-LOW 望远镜到珀斯的处理设施，平均每秒

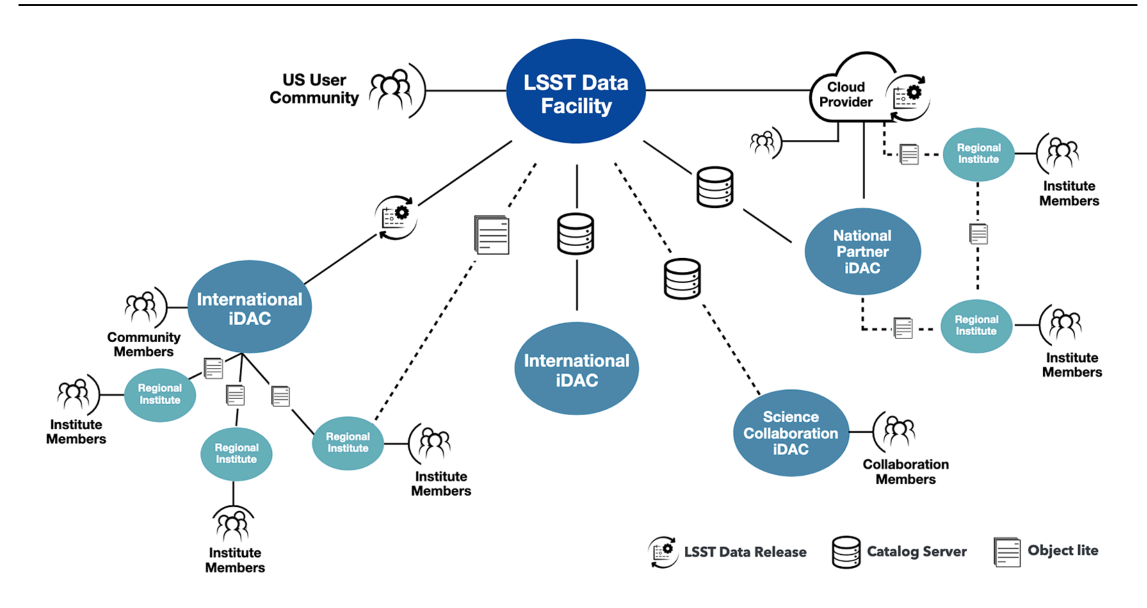


图 4 LSST 的国际数据访问中心的拓扑结构

将传输 8 TB 数据，传输距离长达数百千米；南非的 SKA1-MID 望远镜设计类似，但数据传输速率更高——从位于卡鲁沙漠的望远镜到开普敦处理设施的传输速率约为 20 TB·s^{-1}。这大约是 ALMA 望远镜所产生的同等数据传输速率的 1 000 倍，比估算的 2022 年全球平均家庭宽带速度快 1.0×10^5 倍①。预计在 SKA 科学运行期间，每年将产生大约 700 PB 的数据，每 15 年预计产生高优先级科学计划的数据约 8.5 EB[28]。由于需要传输、处理、存储和分发给全球最终用户的数据量巨大，SKA 项目被许多人认为是终极大数据挑战[29, 30]。

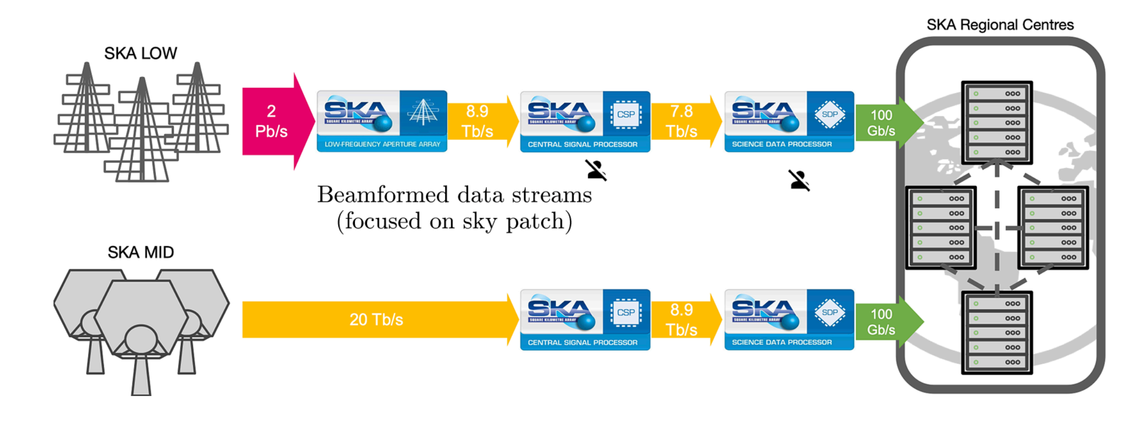


图 5 SKA 数据流示意图

受限于站址现场计算能力，SKA 天文台 (SKA Observatory, SKAO) 正在与国际社会合作，创建 SKA 区域中心 (SKA Regional Centre, SRC)。科学数据处理器 (Scientific Data

①https://www.skao.int/en/explore/big-data

Processor, SDP) 生成的初步科学产品将传输到 SRC，后续的数据深加工继续采用 SDP 相应软件在 SRC 完成。在这个模型中，SKAO 将得到全球网络的支持，在其成员国中分布的 SRC 将构建一个端到端的科学数据系统，分布式存储数据，共享计算和网络能力。SRC 在整个 SKA 数据处理中的地位如图 6 所示[①]，分布在世界各地的 SKA 区域中心全球网络 (SKA Regional Centre Network, SRCNet)[31, 32]（见图 7[②]）将提供 SKA 数据的深度处理、科学分析、长期存储，以及用户支持，提供所有科学家按 FAIR (Find, Access, Interoperate, Re-use) 模式开展科学研究工作。SRCNet 将根据天文学家的需要调整其数据处理能力，为 SKA 社区提供访问支持及其数据产品、科研合作平台；为用户提供透明和位置无关的界面，支持所有 SKA 用户访问项目数据；提供一个开发软件工具（分析、建模、可视化）的平台。不同的 SRC 可能是异构的，即不同的 SRC 使用现有的国家高性能计算基础设施，新的专用设施甚至云组件。无论其构成如何，每个 SRC 都将以标准化的方式为 SKA 用户提供服务。SRCNet 将被设计成具备有效地存档、分发和处理由 SKAO 产生的科学大数据产品，在推进天文学研究中发挥关键作用。

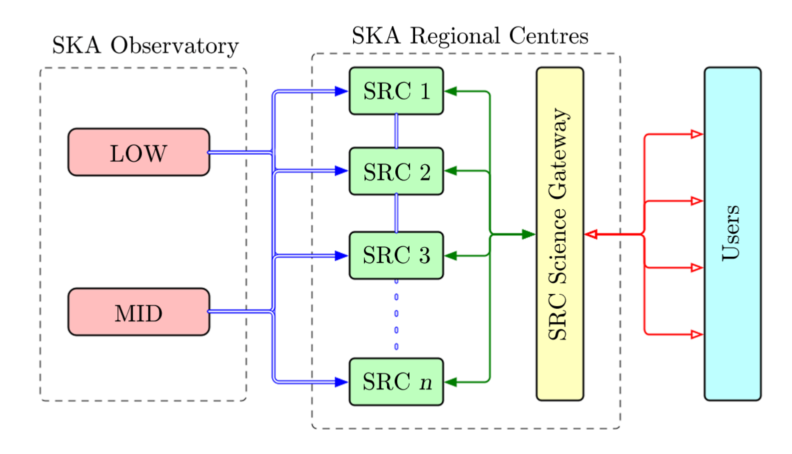


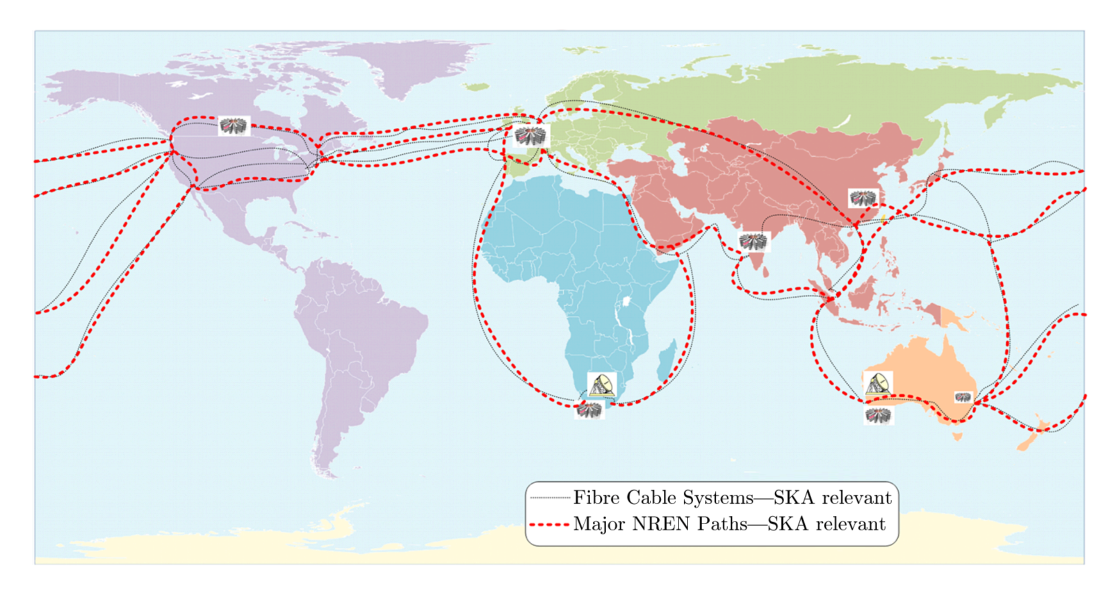
图 6 科学区域中心在 SKA 数据处理中的作用

当前 SRCNet 内的计算模型还有待确定，提出的几种方法包括基于云的环境、分布式系统或数据网格方案。科学用户将向 SRCNet 提交各种各样的计算过程和任务，从运行在工作负载管理器 (如 slurm) 之上的复杂管道到专注于使用大量数据的孤立操作和功能。来自望远镜的数据将分布在 SRCNet 节点的全球范围内，因此有必要考虑数据和计算的位置，以便尽可能将计算移动到数据所在的位置[33]。最终用户通过 SKA 数据挑战[34, 35]等方法对 SRCNet 中预期的计算量和类型进行初步的测算。

随着 SKA 望远镜建设不断推进，基于 SRC 的科学数据处理与分析系统的建设正成为各国关注的重点，部分国家（如英国、澳大利亚、南非等）已经开始研制面向科学的数据处理分析管线。欧洲 SKA 天文学电子基础设施先进网络 (Advanced European Network of

[①]https://www.skao.int/en/science-users/119/ska-regional-centres

[②]https://www.skao.int/en/science-users/119/ska-regional-centres



注：目前主要国家研究和教育网络 (National Research and Education Network, NREN) 供应商代表已经为 SKA 开发了一个全球数据传输模型，将建设基于连接站点和区域中心的全双工链路。

图 7　SKA 区域中心网络

E-infrastructures for Astronomy with the SKA, AENEAS①) 汇集了当前属于 SKA 项目的所有欧洲成员国，潜在的未来欧盟 SKA 国家合作伙伴，SKA 组织本身以及包括澳大利亚和南非两个台址国的大型国际合作伙伴。AENEAS 一直在为欧洲 SKA 区域中心开发设计方案，而 ESCAPE 项目 (The European Science Cluster of Astronomy & Particle Physics, 2019－2022) 为 SRC 技术开发原型提供解决方案，并定义天文学和粒子物理学中的欧洲开放科学云。ERIDANUS 项目 (Exascale Research Infrastructure for Data in Asia-Pacific astroNomy Using the SKA)② 专注于在澳大利亚和中国 SRC 部署数据密集型研究基础设施原型和中间件。

加拿大射电天文数据分析计划 (Canadian Initiative for Radio Astronomy Data Analysis, CIRADA)③ 将建立新的硬件，以增强、研究数据库和科学数据产品，力争实现从下一代射电天文学设施到 SKA 的开创性科学。CIRADA 的工作分为四个主要类别，包括科学数据产品（包括收集用户故事示例）、预处理程序系统、大容量数据存储、交叉匹配和公共可访问性。西班牙 SKA 区域中心原型 (Spanish prototype of an SRC, SPSRC) 正积极参与开放科学实践，以支持未来的 SKA 项目，包括使用 SKA 探路者（如 MeerKAT 和 LOFAR）的科学研究。SPSRC 的开发包括硬件和云计算基础设施的建设、科学档案、软件和服务、用户支持和培训，以及与其他 SKA 区域中心的合作。SPSRC 的建设考虑了开放科学的原则，

①https://www.aeneas2020.eu/

②https://eridanus.net.au

③https://cirada.ca/

旨在促进科学数据的可发现性、可访问性、互操作性和可重用性，并支持 SKA 科学数据处理器 (SDP) 产生的庞大数据的存储和分析。SPSRC 的建设预计将于 2025 年完成大部分功能，并在 2030 年达到全面运行能力[36]。

印度计划构建一个 SKA 区域中心原型 (proto-SRC)，以应对 SKA 产生的庞大数据量[37, 38]。这个 proto-SRC 将用于分析印度参与的 SKA 探路者和主要参与的望远镜项目（如 uGMRT、MeerKAT 和 MWA）的数据，并为将来的全尺寸 SRC 提供技术测试和人才培训的平台。当前已规划存储能力约为 10 PB 的设备，配备相应的计算资源，以及开发适合 SKA 数据处理和分析的软件，包括算法实现、数据处理流程和数据可视化软件。此外，印度 proto-SRC 将与全球其他区域中心合作，共享新硬件和软件技术的知识与经验，为建造全面的 SKA 区域中心奠定基础。

中国已完成世界首个 SKA 区域中心原型 (China SKA regional centre prototype, CSRC-P)[39, 40] 的建设，标志着在大规模部署 SKA 数据方面迈出了重要一步。CSRC-P 包括一个功能完备的高性能计算系统，设计以科学需求为导向，考虑了 SKA 数据的复杂性、不同科学项目对计算和存储资源的需求以及高度并发的数据流。系统采用了通用和异构计算架构，目前已完成性能测试，其中 ARM 处理器在 SKA 中首次使用，展示了与 Intel 处理器相当的性能，同时，CSRC-P 在存储和网络方面也展现了显著的性能提升，其软件环境已成功部署并建立了与澳大利亚 Pawsey 超级计算中心的高速数据传输连接，为全球科学家提供必要的计算资源、高质量的数据产品和技术支持，以推进 SKA 早期科学探索。

4 当前面临的挑战和对未来工作的启示

4.1 资金筹措

在国际天文大装置科学区域中心的建设与运行中，资金限制是一个亟待解决的关键难题。资金不仅是建设科学区域中心的基础，更是其持续运营和维护的保障。随着科学研究的不断深入，尤其是在天文学领域，所需的资金投入往往呈现出指数级增长，这使得许多国家在资源配置上面临困难。天文项目的高昂成本使得资金筹集成为一项复杂的任务。科学区域中心的建设通常需要巨额的前期投资，包括基础设施建设、设备采购和技术研发等。以 ALMA 为例，其初始投资超过 14 亿美元，这一巨额投资不仅涵盖硬件的采购，还包括软件开发、人员培训和运营支持等多方面的费用。对于许多国家而言，这样的资金投入超出了其科研预算的承受能力，导致项目的推进受到限制。

此外，资金的不确定性对科学区域中心的长期规划和稳定性产生了负面影响。在许多国家，科研经费往往依赖于政府预算和年度拨款，这种依赖性使得科学区域中心在资金保障上面临波动。经济衰退、政策变动或优先事项的调整都可能导致资金的削减，从而影响到科学区域中心的运营。例如，在经济危机期间，许多国家的科研预算被迫缩减，导致原本计划中的项目被推迟或取消，这不仅影响了科学研究的进展，也损害了国际合作的信任基础。资金限制还直接影响到人才的培养和引进。科学区域中心需要高水平的科研人员和技术支持团

队，而这些人才的招聘和培训同样需要大量的资金投入。由于资金不足，许多中心难以提供具有竞争力的薪酬和发展机会，导致人才流失或无法吸引优秀人才。这种人才短缺进一步限制了科学区域中心的研究能力和创新潜力。资金不确定性的另一方面表现在汇率的影响。由于汇率的波动，会导致参与国的实际投入出现显著的变化，这极大地影响了原定的投资预算和各国对项目的支撑能力。

在应对资金问题时，国际合作的确是目前一种有效的解决方案。事实上本文所讨论的国际天文大装置都是通过国际合作来解决资金问题。通过多国联合投资，科学区域中心可以分摊建设和运营成本，从而减轻单一国家的经济负担。此外，建立公私合营 (PPP) 模式，吸引企业和私人投资者参与资金筹集，也为科学区域中心的可持续发展提供了新的思路。例如，某些天文项目通过与科技公司合作，获得了资金支持，同时也促进了技术的转移和应用。

总体来看，资金不足是国际天文大装置科学区域中心建设与运行中的一大问题。解决这一问题需要各国在资金筹集、资源配置和国际合作等方面进行深入思考和创新实践，以确保科学区域中心能够在可持续的基础上推动天文学的发展。

4.2 国际合作的复杂性与挑战

随着全球化的深入发展，跨国界的科研合作已成为常态。国际合作能够解决资金问题，但随之而来的国际合作复杂性，逐渐成为建设国际天文大装置科学区域中心时面临的一个重要问题。

不同国家的法律和规章制度差异为国际合作带来了复杂性。科学区域中心的建设与运行需要遵守所在国的法律法规，包括税收、劳动法、知识产权保护等。例如，数据共享和隐私保护的法律规定在各国不尽相同，这就需要科学区域中心在数据管理上制定统一的标准，以确保符合所有参与国的法律要求。这其中需要特别注意的是，我国鼓励在数据安全治理、数据开发利用等领域开展国际交流与合作，并参与数据安全相关国际规则和标准的制定。在国际合作中，可以依据中国缔结或参加的国际条约、协定，或者按照平等互利原则，处理跨境数据流动问题。

文化差异也是国际合作中不可忽视的因素。科研人员具有不同的文化背景，他们的工作习惯、沟通方式和决策过程可能存在差异。这些差异可能导致误解和冲突，影响团队的协作效率。为了克服这一挑战，科学区域中心需要建立有效的跨文化交流机制，包括提供文化敏感性培训、建立多语言的沟通平台和制定包容性的管理策略。此外，语言障碍也是国际合作中需要解决的问题。虽然科学界普遍使用英语作为交流语言，但仍有部分研究人员的英语水平有限，这限制了他们的参与度和沟通效率。

需要关注的是，国际政治的变化也对科学区域中心的合作稳定性构成威胁。政治因素可能导致合作项目的中断或重新谈判，影响项目的连续性和进度。例如，国际关系紧张可能会影响到科研经费的流动、人员的流动和数据的共享。因此，科学区域中心需要建立灵活的合作机制，以应对政治变化带来的不确定性。

资源分配的公平性也是国际合作中需要考虑的问题。科学区域中心的建设与运行需要合理分配资源，包括资金、设备和人才。不同国家对资源的贡献和需求可能存在差异，如何平衡各方的利益，确保合作的公平性和可持续性，是科学区域中心需要面对的挑战。

4.3 可持续发展问题

科学区域中心的可持续性维护与发展是科学区域中心面临的关键问题之一，尤其是在天文数据量不断增长的背景下。数据中心作为科学区域中心的核心组成部分，其稳定性、安全性和可扩展性对于科学研究的连续性和数据的长期价值至关重要。

从 ALMA 当前的科学区域中心建设与运行来看，科学区域中心的能源消耗问题对可持续性构成了挑战。随着数据中心规模的扩大和计算能力的增强，其能源需求也在持续增长。能源消耗不仅带来了经济成本，还对环境产生了影响。数据中心的硬件和软件维护需要持续的投入。随着技术的快速发展，数据中心的设备和系统需要定期升级和维护，以保持其性能和安全性。这不仅需要资金支持，还需要专业的技术团队来进行管理和操作。

从可持续发展来看，数据管理是当前面临的最大挑战。数据管理策略对科学区域中心可持续发展极为重要。随着数据量的增加，如何有效地存储、备份和归档数据，以及如何确保数据的安全性和隐私性，都是需要解决的问题。为了满足日益增多的数据量的管理要求，科学区域中心的可扩展性是确保其可持续发展的关键因素。随着科学研究的深入，数据量和用户需求可能会迅速增长，数据中心需要能够灵活地扩展其容量和性能。这要求科学区域中心在设计数据中心时就考虑到未来的扩展需求，采用模块化和可扩展的架构。为了确保数据的可靠性，灾难恢复和业务连续性规划对于保障其长期稳定运行至关重要。自然灾害、人为错误或其他不可预见的事件都可能导致数据中心的故障或数据丢失。因此，科学区域中心需要制定灾难恢复计划，包括数据备份、系统冗余和应急响应机制，以确保在任何情况下都能保护数据的安全和科研活动的连续性。

总体来看，未来科学区域中心的可持续性维护与发展，迫切需要科学区域中心在能源效率、技术维护、数据管理、可扩展性和灾难恢复等方面进行综合考虑和规划。通过采取有效的策略和措施，科学区域中心可以确保数据中心的长期稳定运行，支持天文学研究的持续发展。

4.4 对未来科学区域中心建设一些启示

我国在大科学工程领域已经取得了显著成就，如 500 m 口径球面射电望远镜 (FAST) 和中国空间站等。国际大天文装置科学区域中心的成功经验，对于我国后续主导或参与国际大科学工程的建设和运行管理具有重要的借鉴意义。结合前文的讨论与分析，我们认为：

(1) 国际科学区域中心的建设与成功运行充分说明了国际合作的重要性。在全球化背景下，国际合作已成为大科学工程不可或缺的一部分。我国在未来主导的大科学工程，应进一步扩大国际合作范围，与世界各国的科研机构建立更紧密的合作关系。通过国际合作，不仅可以共享资源、技术和数据，还可以促进科研人员的交流与培训，提高我国科研人员的专业水平和国际视野。

(2) 科学区域中心的可持续发展需要长期稳定的资金支持，需要建立多元化的资金筹措

机制，包括政府投入、企业投资、国际合作资金等。同时，还需要加强对科学中心运行资金的监管和审计，确保资金的有效使用。这其中，要建立并依赖高效的管理和运营机制。我国在未来建设科学中心时，应借鉴国际先进的管理经验，建立科学、高效的管理运营体系。这包括明确科学中心的定位和目标、优化组织结构、完善决策机制、强化风险管理等。此外，还需要加强科学中心的人才培养和引进，建立一支高水平的科研和管理团队。

(3) 科学区域中心的建设应把科学普及和教育放在重要的位置。科学中心不仅是科研的基地，也是科学普及和教育的平台。我国在未来建设科学区域中心时，应加强与教育部门的合作，开展多种形式的科学普及活动，提高公众的科学素养，培养青少年对科学的兴趣。考虑科学中心对当地社会经济发展的带动作用，通过科学中心的建设促进当地产业结构的优化和升级。

(4) 新技术的出现会显著地改变科学区域中心的建设与运作模式。客观来看，当代科学区域中心的建设依赖于信息技术的快速发展，互联网技术、高性能计算是科学区域中心的基础技术支撑。正是高速网络与 PB/EB 级超算推动了科学区域中心的建设。可以预见，未来人工智能技术、下一代互联网技术、大量出现的算力中心都有可能为未来的科学区域中心带来新的模式。我们应该关注这个方面的进展，根据不同科学装置（设施）的要求，充分利用前沿技术，适度超前规划建设。

综上所述，国际科学区域中心的建设为我国未来建设科学中心提供了多方面的启示，包括加强国际合作、确保资金支持、建立高效的管理运营机制、加强科学普及和教育以及考虑环境和社会效益等。通过借鉴这些经验，我国可以更好地推进大科学工程的建设和发展，提升我国在国际科学领域的影响力和竞争力。

5 结 论

本文通过深入探讨国际天文大装置科学区域中心的建设与运行，揭示了这些中心在天文学研究中不可或缺的作用。从 ALMA、LOFAR、LSST 和 SKA 等项目的分析中，我们可以看到科学区域中心不仅作为数据处理和存储的枢纽，而且是科研合作、教育推广和技术转移的重要平台，在推动科学发现、培养科研人才、推动科学普及和经济发展方面发挥了重要作用。

面对资源分配、数据共享和合作机制等方面的挑战，科学区域中心的建设和运维需要不断创新和改进。未来，科学区域中心的发展应更加注重国际合作的深化、资金筹措机制的多元化、管理运营体系的高效化以及科学普及和教育的强化。通过这些措施，科学区域中心将能够更好地适应数据量不断增长和科技快速发展的趋势，为天文学及其他学科的可持续发展做出更大的贡献。我们相信，随着科学技术的进步和国际合作的加强，科学区域中心将在全球科学研究中扮演着越来越重要的角色，推动人类对宇宙的理解和探索达到新的高度。

参考文献：

[1] Blundell R. 2007 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium, Honolulu: IEEE, 2007: 1857
[2] Bustos R, Rubio M, Otárola A, et al. PASP, 2014, 126(946): 1126
[3] Wootten A, Thompson A R. Proceedings of the IEEE, 2009, 97(8): 1463
[4] Nan R, Peng B, Qiu Y, et al. Kilometer-square Area Radio Synthesis Telescope KARST, SKA Memo 17, Manchester: SKA Observatory, 2002: 1
[5] Dewdney P, Lazio T, Hall P, et al. Radio Science Bulletin, 2008, 326: 4
[6] van Haarlem M P, Wise M W, Gunst A, et al. Astronomy & Astrophysics, 2013, 556: A2
[7] Abramovici A, Althouse W E, Drever R W, et al. Science, 1992, 256(5055): 325
[8] Aasi J, Abbott B, Abbott R, et al. Classical and Quantum Gravity, 2015, 32(7): 074001
[9] Parra-Royón M, Rodríguez-Gallardo Á, Sánchez-Expósito S, et al. 2024 IEEE International Conference on Evolving and Adaptive Intelligent Systems (EAIS), Madrid: IEEE, 2024: 1
[10] Andreani P, Stoehr F, Zwaan M, et al. SPIE, 2014, 9149: 357
[11] Schnee S L, Brogan C, Espada D, et al. ASPC, 2014, 9149: 364
[12] Rafferty D, Haarlem M, Iacobelli M, et al. Astronomy & Astrophysics, 2013, 556: A2
[13] Renting G, Holties H. Astronomical Data Analysis Software and Systems XX. Boston: SPIE, 2011, 442: 49
[14] Holties H, Renting A, Grange Y. Software and Cyberinfrastructure for Astronomy II. Amsterdam: SPIE, 2012, 8451: 451
[15] Begeman K, Belikov A, Boxhoorn D, et al. Experimental Astronomy, 2013, 35: 345
[16] manzano C, Miskolczi A, Stiele H, et al. Astronomy and Computing, 2024, 48: 100835
[17] Ivezić Ž, Kahn S M, Tyson J A, et al. ApJ, 2019, 873(2): 111
[18] LSST Science Collaboration, Abell P A, Allison J, et al. arXiv:0912.0201, 2009
[19] Stepp L M, Gilmozzi R, Hall H J. Ground-based and Airborne Telescopes V, Canada: SPIE, 2014: 9145
[20] McLean I S, Ramsay S K, Takami H. SPIE, 2010, 7735: 1
[21] Jurić M, Kantor J, Lim K T, et al. ASPC, 2017, 512: 279
[22] Juric M, Lupton R, Axelrod T. Data Management Applications Design, Chile: SPIE, 2013: 151
[23] Freemon M, Kantor J. LSST Data Management Infrastructure Design, Chile: LSST, 2013: 129
[24] Juric M, Axelrod T, Becker A, et al. Large Synoptic Survey Telescope Data Products Definition Document, Chile: LSST, 2016: 163
[25] Wang D L, Monkewitz S M, Lim K T, et al. State of the Practice Reports, USA: Association for Computing Machinery, 2011: 11
[26] Dewdney P E, Hall P J, Schilizzi R T, et al. Proceedings of the IEEE, 2009, 97(8): 1482
[27] Weltman A, Bull P, Camera S, et al. Publications of the Astronomical Society of Australia, 2020, 37: e002
[28] Scaife A M M, Joshi R, Cantwell T M, et al. Compute and Storage for SKA Regional Centres, India: IEEE, 2019: 401
[29] Chrysostomou A, Taljaard C, Bolton R, et al. Observatory Operations: Strategies, Processes, and Online Only. Systems VIII. Online Only: SPIE, 2020, 11449: 156
[30] Chrysostomou A, Bolton R, Davis G R. Observatory Operations: Strategies, Processes, and Systems VII. Austin: SPIE, 2018, 10704: 487
[31] Garrido J, Verdes-Montenegro L, Sánchez S, et al. Highlights of Spanish Astrophysics XI, 2023: 360
[32] Verdes-Montenegro L, Sánchez-Expósito S, Garrido J, et al. SKA Regional Centres and Open Science with the SKA, Spain: Spanish Astronomical Society, 2019: 55
[33] Machado I A, Costa C, Santos M Y. Procedia Computer Science, 2022, 196: 263
[34] Hartley P, Bonaldi A, Braun R, et al. MNRAS, 2023, 523(2): 1967
[35] Bonaldi A, An T, Brüggen M, et al. MNRAS, 2021, 500(3): 3821
[36] Garrido J, Darriba L, Sánchez-Expósito S, et al. Journal of Astronomical Telescopes Instruments and Systems, 2022, 8(1): 011004

[37] Wadadekar Y, Bhattacharya D, Datta A, et al. Journal of Astrophysics and Astronomy, 2023, 44(1): 9
[38] Gupta Y, Bhattacharya D, Choudhury T R, et al. Journal of Astrophysics and Astronomy, 2023, 44(1): 27
[39] An T, Wu X, Lao B, et al. Science China Physics, Mechanics & Astronomy, 2022, 65(12): 129501
[40] An T, Wu X P, Hong X. Nature Astronomy, 2019, 3(11): 1030

Establishment and Operation of the International Scientific Regional Center for Astronomical Mega-Facilities

LIU Shuang[1], SHEN Zhiqiang[2], AN Tao[2], WANG Feng[3], GUO Quan[2], ZUO Cheng[1], LIU Yiliang[1], ZHAO Jing[1]

(1. ISTCC, Beijing 100036, China; 2. Shanghai Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China; 3. Guangzhou University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: With the continuous deepening of astronomical research, the construction and operation of the International Astronomical Large Facility (IALF) has increasingly become an essential factor in promoting scientific progress. This study summarizes the current construction and operation mechanism of the International Astronomical Large Devices (IALDs) science regional centers and discusses their roles in data management, scientific cooperation, and user support. Firstly, it introduces the definition of science regional centers and their importance in astronomical research and then analyzes the successful cases of several typical regional centers, including the Low-Frequency Array (LOFAR) telescope and the Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA), emphasizing the impact of infrastructure, technology investments, and management structures on their success. In addition, this study discusses the current challenges, such as resource allocation, data sharing, and cooperation mechanisms, and anticipates future directions and trends. By summarizing the practical experiences at home and abroad, this paper aims to provide references and lessons for the construction and operation of future scientific regional centers for astronomical mega facilities.

Key words: radio astronomy; astronomical mega facilities; regional centers